

Análisis de los cambios de cobertura de suelo derivados de la expansión urbana de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, 1990-2000

Recibido: 23 de octubre de 2007. Aceptado en versión final: 11 de junio de 2008.

Víctor Hugo López Vázquez*
Wensleslao Plata Rocha*

Resumen. El artículo presenta un estudio de los cambios de cobertura del suelo ocurridos durante la década de 1990 producto del crecimiento urbano de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM). Para ello, se empleó una metodología que combina el uso de técnicas de clasificación digital y visual a partir de imágenes de satélite, sistemas de información geográfica (SIG) y análisis estadísticos, con el fin de observar los cambios espacio-temporales ocurridos en la zona e identificar las coberturas de suelo sujetas a mayor presión por parte de la expansión urbana. El método emplea

el análisis de una matriz de tabulación cruzada a diferentes niveles para distinguir aquellos cambios producto de transiciones sistemáticas, con el fin de realizar valoraciones más completas de los cambios más significativos ocurridos en el territorio.

Palabras clave: Cambios de usos de suelo, transiciones sistemáticas, crecimiento urbano, Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Analysis of the land cover change caused by the Mexico City Metropolitan Area expansion, 1990-2000

Abstract. This article offer a land cover change analysis produced by the growth of Mexico City Metropolitan Area during de 90's decade. We use a methodology that combine digital and visual techniques to classify satellital images, Geographic Information Systems (GIS) and statistics analysis to identify the land covers under pressure by the urban expansion. The method make use of the cross tabulation matrix

to examine the land changes in differents scales focused on the strongest signals of systematic landscape transitions to assess the spatial significant changes.

Key words: Land use changes, systematic transitions, urban growth, Metropolitan Area of Mexico city.

* Departamento de Geografía [Doctorado en Cartografía, SIG y Teledetección], Universidad de Alcalá de Henares, Calle Colegios, 2, 28801 Alcalá de Henares, Madrid, España. E-mail: hugo.lopez@alu.uah.es, wensleslao.plata@alu.uah.es

INTRODUCCIÓN

Las actividades humanas se han convertido en el principal desencadenador de las transformaciones ambientales y el crecimiento de las ciudades representan uno de los principales responsables de gran parte de esos cambios, entre ellos los que se refieren a cambios de usos del suelo. El crecimiento urbano ejerce una enorme presión sobre el territorio y sus recursos naturales, lo que afecta la calidad de vida de las personas y la sostenibilidad general de la zona. Estudios recientes indican que para finales del 2007, más del 50% de la población mundial habitará en núcleos urbanos y para el 2030 esta cifra alcanzará los 5 000 millones de personas, lo que representará el 84% del total de la población (ONU, 2004).

Para México, estas tendencias no son ajenas, ya que desde la década de los años setenta su población habita mayoritariamente en núcleos urbanos, y aunque las tasas de crecimiento han disminuido en los últimos años, se espera que a mediano plazo la población urbana llegue a superar el 80% del total nacional (INEGI, 2002). Dentro de este contexto, la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) seguirá ocupando el lugar de primacía tanto económico como poblacional del país al contener más de un cuarto de la población urbana nacional; además, el crecimiento horizontal predominante continuará expandiendo el ambiente artificial al interconectar diversos núcleos urbanos, ocupar espacios intersticiales y afectando espacios abiertos, lo que acentuará las presiones y desequilibrios ecológico-ambientales (Aguilar, 2002).

El crecimiento urbano ha sido considerado como una señal de prosperidad económica, no obstante, en la actualidad esos beneficios están siendo continuamente debatidos y balanceados contra los impactos ambientales que producen, entre ellos, los que incluyen los cambios de usos de suelo (Yuan *et al.*, 2005). Ante esta situación y en vista del alcance que los procesos de crecimiento urbano han llegado a tener sobre el uso del territorio, resulta de gran interés conocer la distribución espacial y temporal de las diferentes coberturas de suelo con el fin de evaluar las condiciones ambientales en las que se presentan los cambios y reconocer sobre

qué coberturas de suelo se está ejerciendo la mayor presión (Stefanov *et al.*, 2001).

Estos cambios y sus consideraciones requieren la aplicación de técnicas que permitan monitorear y evaluar correctamente su evolución a lo largo del tiempo. El uso de la teledetección en estudios para monitorear el cambio de cobertura, producto de la expansión urbana, ha demostrado su potencial para proporcionar información espacial con niveles de precisión aceptables y con un gasto de tiempo relativamente corto (Seto *et al.*, 2002). Sin embargo, muchos de los análisis fallan en sus evaluaciones debido a que los métodos estadísticos, comúnmente usados para interpretar los datos, carecen de conceptos fundamentales para el análisis de cambios de cobertura, ya que no captan las señales más firmes de cambios sistemáticos y sólo evalúan los cambios predominantes (Pontius *et al.*, 2004).

De esta manera, el objetivo de este trabajo es realizar un análisis de los cambios de cobertura del suelo producidos por la expansión urbana de la ZMCM entre 1990 y 2000, con el fin de determinar las señales más firmes de cambio sistemático y ganar en entendimiento sobre las coberturas sujetas a mayor presión por parte de la ciudad. Para ello, se integran procedimientos de teledetección y SIG que permiten la cuantificación del área urbana en ambas fechas a partir de la utilización de imágenes de satélite Landsat y mapas de uso del suelo; además, a través de una matriz de tabulación cruzada, se analizan diferentes niveles de interpretación con la obtención de las ganancias, los intercambios, la persistencia, el cambio total, el cambio neto y transiciones sistemáticas más significativas que se han producido por la presión urbana.

Área en estudio

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México se localiza en el centro de la República Mexicana, entre los 19° 03' y 19° 54' de latitud Norte, y los 98° 38' y 99° 31' de longitud Oeste, dentro de la denominada cuenca de México. Actualmente está considerada como la segunda área urbana más grande del mundo, sólo por debajo de Tokio; cuenta con una población de más 18 millones de habitantes (INEGI, 2002) y una extensión de área construida de 1 466 km² a lo largo de 5 196 km²

de superficie que componen la totalidad de delegaciones y municipios que la conforman. A pesar de que las estadísticas indican que el crecimiento poblacional de la ciudad se ha reducido con respecto a las décadas anteriores, este cambio sólo es aparente, ya que la fuerte tendencia de concentración de la población urbana en los municipios del Estado de México ha mantenido tasas por encima incluso de los niveles nacionales. Mientras que en el Distrito Federal existen delegaciones con crecimientos negativos, algunos municipios del Estado de México crecen a tasas superiores al 5% (Tabla 1).

La expansión metropolitana de la ciudad, que da comienzo en la década de 1950 al aparecer los primeros rasgos de integración física y funcional de unidades político administrativas contiguas, no ha dejado de anexas espacios, consumir recursos y transformar el medio ambiente a su alrededor. Su mancha actual comprende dos entidades federativas: Distrito Federal y Estado de México, se expande por las 16 delegaciones de la primera y 39 municipios de la segunda (Sobrino, 2000;

Tabla 1. Evolución de las tasas de crecimiento poblacional urbano

	Tasa de crecimiento de la población urbana			
	40-50	50-70	70-90	90-2000
Nacional	3.97	5.31	4.09	1.14
ZMCM	5.97	5.21	2.81	1.79
Distrito Federal	5.67	4.15	0.98	0.30
Estado de México		16.29	6.85	3.40

Fuente: INEGI, 2002; Schteingart y Salazar, 2005; cálculos propios.

Figura 1). En términos espaciales la ciudad ha crecido en más del 500% desde 1950 y su crecimiento horizontal demanda cada vez mayor consumo de suelo. En este sentido, es en el Estado de México donde se presenta el mayor crecimiento; mientras que en el Distrito Federal el crecimiento territorial registrado entre 1990 a 2000 fue del 3%, en el Estado de México este cambio fue cercano al

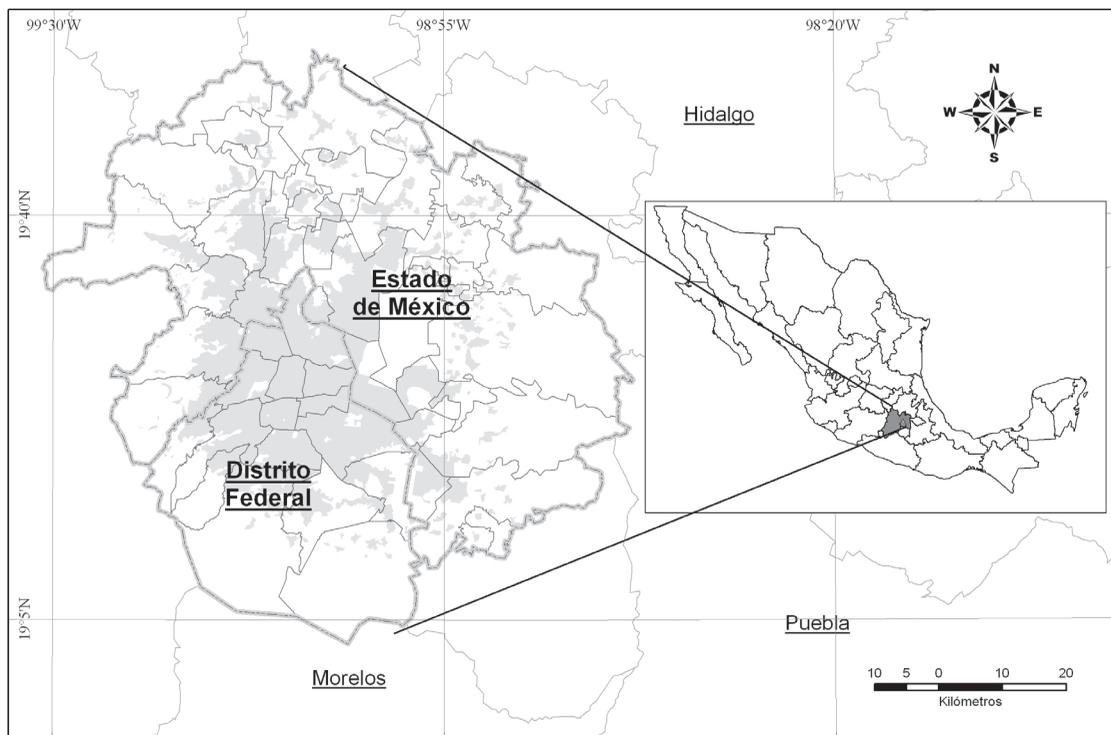


Figura 1. Localización del área en estudio.

Fuente: elaboración propia.

30%, por lo que actualmente la mayor parte de la concentración poblacional y de área urbana se encuentra dentro de este estado (Tabla 2).

METODOLOGÍA

Clasificación de imágenes para la obtención del área urbana

En las dos últimas décadas las técnicas orientadas a la detección de cambios a través de imágenes de satélite y las metodologías de análisis como las de divergencias, regresiones, índices de vegetación, o componentes principales, han ido en aumento. No obstante, la heterogeneidad en el comportamiento de las áreas urbanas producto de la alta variación espacial y espectral ha tornado difícil su clasificación, y aunque diversos estudios han demostrado la validez de las distintas metodologías, aún no existe un consenso sobre cuál es el mejor método a ser empleado, por lo que éste va estar en relación con la disponibilidad de los datos, la extensión del área en estudio, el tiempo, las limitantes informáticas y sobre todo con el tipo de aplicación (Seto *et al.*, 2002).

En estudios de áreas urbanas, el uso de la tele-detección y los SIG ofrecen considerables ventajas para la generación, cuantificación y validación de los datos, por lo que ha sido posible definir e identificar entidades espaciales relevantes, cambios de usos de suelo, patrones de crecimiento y modelos de predicción (Kaya y Curran, 2006; Yin *et al.*, 2005; Tan *et al.*, 2005; Wu, 2004; López *et al.*, 2001; Masser, 2001; Molina, 1998).

El análisis de los cambios en las coberturas de suelo en esta investigación, inicialmente partió del cruce de los mapas de vegetación y usos de suelo preparados por el Instituto Nacional de Ecología (INE) para 1993 y 2000, los cuales estaban orientados a realizar un estudio de los cambios de usos de suelo a nivel nacional (Velázquez *et al.*, 2002). No obstante, después de un análisis visual de la cobertura urbana sobre una imagen de satélite, se observó que en algunos casos subestimaba y en otros se sobreestimaba el área urbana.

Por este motivo se decidió obtener las áreas urbanas nuevamente tomando como base imágenes de satélite y un algoritmo de clasificación diferente al realizado en el estudio original. De esta manera, la determinación del área urbana se basó en la utilización de imágenes Landsat con resolución de 30 m debido principalmente a dos razones: que éstas ya han probado ser efectivas en estudios urbanos (Kaya y Curran, 2006; Yuan *et al.*, 2005; Tian *et al.*, 2005; Guindon *et al.*, 2004; Molina, 1998), y a que la adquisición de las escenas georreferenciadas es gratuita a través del servidor de Internet Global Land Cover. En este sentido, se crearon dos mosaicos conformados por dos escenas (Path26-Row46 y Path26-Row47) con fechas de 7 de marzo de 1989 (sensor TM) y 21 de marzo de 2000 (sensor ETM) para cubrir el área en estudio.

Se optó por la aplicación de un modelo como base para la clasificación de tipo espectral, denominado Tasseled Cap (TC), debido a que la configuración de los planos que genera permite tener mayor variabilidad entre los elementos y las áreas urbanas son susceptibles de ser identificadas (Seto

Tabla 2. Población total y área urbana por entidad federativa

	Población								Área urbana en km ²							
	1950	%	1970	%	1990	%	2000	%	1950	%	1970	%	1990	%	2000	%
Distrito Federal	3 050 442	97	6 874 120	79	8 350 595	55	8 605 239	48	195	95	462	65	653	52	677	46
Edo. de México	87 111	3	1 782 584	21	6 703 411	45	9 363 656	52	11	5	246	35	611	48	789	54

Fuente: INEGI, 2002; Schteingart y Salazar, 2005; Ezcurra *et al.*, 2006 y cálculos propios.

et al., 2002; Chuvieco, 2002), para ello las bandas originales de la imagen fueron transformadas a valores de reflectividad con el fin de trabajar con valores físicos de significado estándar, lo que permite que se utilicen todas las bandas disponibles del sensor, excepto la térmica, para obtener nuevas bandas que resuman los datos sin perder la información significativa de cada uno de ellos.

Este método parte de las bandas originales de la imagen y a través de una combinación lineal se obtienen nuevas bandas, las cuales realzan los rasgos de interés en la escena. Lo que pretende el TC es poner en evidencia el comportamiento espectral de la vegetación y el suelo al crear nuevos ejes ajustados al espacio físico. Con la rotación de las imágenes originales se obtienen tres planos: brillo, verdor y humedad, los cuales están directamente asociados con los valores físicos de la escena; el brillo puede ser interpretado como el albedo de la imagen, el verdor es similar a un índice normalizado de vegetación (NDVI) y la humedad se relaciona con la cantidad de agua contenida en la vegetación y el suelo. Esta configuración de los planos permite tener mayor variabilidad entre los elementos vegetales de los que no lo son, entre los suelos desnudos y la humedad contenida en ellos, por lo que los elementos urbanos son susceptibles de ser identificados (Seto *et al.*, 2002; Huang *et al.*, 2002; Crist y Kauth, 1986; Figura 2).

Para obtener el área urbana, se clasificó y discriminó a los diferentes elementos contenidos en la escena a partir de la conformación de ocho clases, basadas en los mapas de los inventarios forestales de 1993 y 2000 y a través de una evaluación visual (Tabla 3). Los sitios de control se seleccionaron a través de un análisis interactivo entre las imágenes con composición de color 4-5-3 ligadas a las gráficas de dispersión de la imagen TC para poder discriminar de manera más precisa las diferentes coberturas. Los píxeles seleccionados debieron ser representativos de las áreas de interés y suficientes en cantidad, en este sentido, aunque no hay una convención para determinar el número exacto de píxeles por clase, existen propuestas que hablan de un número de píxeles de entre 10 y 100 *m*, donde la *m* correspondería al número de bandas que se utilizaran para la clasificación (Chuvieco, 2002).

Una vez seleccionadas las clases se aplicó una clasificación supervisada utilizando el criterio de máxima probabilidad, el cual permite ajustar con mayor robustez la disposición original de los datos (Molina, 1998). Para estimar la precisión de la clasificación se generaron 50 puntos aleatorios independientes para cada clase en cada una de las imágenes, a los cuales se les clasificó dentro de alguna de las ocho categorías seleccionadas. Se realizó una tabulación cruzada o matriz de confu-

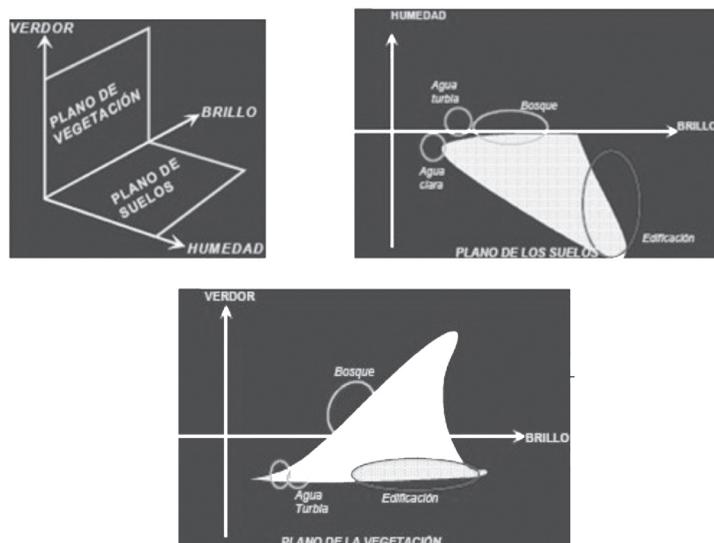


Figura 2. Planos obtenidos con Tasseled Cap.

Fuente: Chuvieco, 2002.

Tabla 3. Categorías para la clasificación de las imágenes Landsat

Coberturas determinadas	Coberturas mapas forestales
Agua	Cuerpo de agua
Sin vegetación aparente	Sin vegetación aparente
Bosque	Bosque de encino Bosque de oyamel Bosque de pino Bosque de pino-encino Plantación forestal
Agricultura de riego	Agricultura de riego (incluye riego eventual)
Agricultura de temporal	Agricultura de temporal
Vegetación herbácea	Bosque de tascate Matorral crasicaule Pastizal inducido Pradera de alta montaña
Asentamiento humano	Asentamiento humano
Vegetación halófila	Vegetación halófila gipsofila

Fuente: INE, 2002.

sión a partir del cruce de los datos y se obtuvo una precisión para el área urbana en 1990 del 72%, mientras que para el 2000 fue del 76%; las mayores confusiones del área urbana se produjeron entre los suelos y la vegetación herbácea debido a la mezcla que existe de estos elementos en el interior de las zonas urbanas y en los bordes de ésta, sin embargo, de acuerdo con Guindon *et al.* (2004) estos valores son aceptables en el sentido de que no se contaba con información de campo ni con información proveniente de fuentes con mayor resolución.

Después de lo anterior, se aplicó un refinamiento de postclasificación para reducir los elementos de error, se extrajo la clase correspondiente a los asentamientos humanos y se aplicó un filtro de paso bajo con una celda de 3x3 para reducir el efecto de sal y pimienta. Como se mencionó anteriormente, el problema de clasificar imágenes para la obtención de áreas urbanas es la mezcla de elementos que dentro de ella se encuentran y la confusión de firmas espectrales que de ello se deriva; por tal razón, una vez obtenida la zona urbana se realizó una corrección manual en aquellas áreas en las que

la clasificación no resultó satisfactoria, con el fin de reducir los errores.

Finalmente la información fue agregada a los mapas de usos de suelo sustituyendo la clase urbana original por la que se obtuvo. Debido a que esta actualización de información produjo sobreposición y huecos en la capa del Inventario Nacional Forestal en ambos años, fue necesario crear reglas topológicas con el fin de corregir dichos errores.

Cambios de usos de suelo

El análisis de los cambios de cobertura de suelo, dentro de este trabajo, está orientado a distinguir aquellas coberturas que sufrieron transiciones sistemáticas significativas de aquéllas que lo hicieron de forma aleatoria, identificar las señales dominantes de cambios de uso y los indicios de cambio por separado en cualquier nivel dado de la persistencia a partir del análisis de dos pares de componentes: cambios netos e intercambios, así como de las ganancias brutas y pérdidas brutas, con el fin de obtener los cambios totales que sufrieron las categorías (Pontius *et al.*, 2004). Para ello, se construye una matriz de tabulación cruzada o matriz de cambios que resulta de cruzar los mapas de las fechas en cuestión (1990 y 2000). En dicha matriz las filas representan las categorías del mapa en el tiempo 1 (T_1) y las columnas las categorías del mapa en el tiempo 2 (T_2) (Tabla 4).

Las áreas que no sufrieron cambios, es decir, las zonas estables (persistencias) entre T_1 y T_2 , se presentan en la diagonal principal de la tabla (P_{jj}); los elementos fuera de la diagonal principal corresponden a las transiciones ocurridas entre categorías; la fila *Total* T_2 (fila 6) indica el área total que ocupa cada clase en T_2 (P_{+n}), mientras que la columna *Total* T_1 (columna 6) representa el área total de cada categoría en el tiempo T_1 (P_{+n}). Usualmente las matrices de tabulación cruzada ofrecen información hasta este punto, no obstante, los análisis llevados a cabo con estos datos podrían llevar a entendimientos erróneos acerca de la dinámica de los cambios de uso del suelo. Por este motivo, se agrega información adicional para ganar en un conocimiento más profundo concerniente a los procesos potenciales que determinan un patrón de cambio de cobertura del suelo.

Tabla 4. Matriz de tabulación cruzada para dos mapas de diferente fecha

Tiempo 1	Tiempo 2						7
	1	2	3	4	5	6	
1		Clase 1	Clase 2	.....	Clase n	Total T_1	Pérdidas (L_{ij})
2	Clase 1	P_{11}	P_{12}	.....	P_{1n}	P_{1+}	$P_{1+} - P_{11}$
3	Clase 2	P_{21}	P_{22}	.....	P_{2n}	P_{2+}	$P_{2+} - P_{22}$
4	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
5	Clase n	P_{n1}	P_{n2}	.....	P_{nn}	P_{n+}	$P_{n+} - P_{nn}$
6	Total T_2	P_{+1}	P_{+2}	.....	P_{+n}	P	
7	Ganancias (G_{ij})	$P_{+1} - P_{11}$	$P_{+2} - P_{22}$	.....	$P_{+n} - P_{nn}$		

Fuente: Pontius *et al.*, 2004.

De esta manera, la fila 7, denominada ganancia bruta (G_{ij}), indica la proporción del paisaje que experimentó un aumento entre el tiempo 1 y el tiempo 2, es decir, la diferencia entre la columna de totales de la fila 6 y lo que permaneció estable. En lo que respecta a la columna 7, ésta corresponde a la pérdida bruta (L_{ij}) que tuvo cada categoría entre T_1 y T_2 , es decir, la diferencia entre $Total T_1$ y los valores de la diagonal principal.

La construcción de esta matriz representa la base para la obtención de información que parta de un nivel de análisis general hasta acercarse al nivel detallado de los cambios producidos en el territorio, así como para determinar si los cambios producidos son producto de una transición sistemática o corresponden a una transición aleatoria. El nivel general está representado por el “cambio neto” y está dado por la diferencia entre el total en el T_2 y el total en T_1 para cada categoría dado en valores absolutos $D_j = |T_2 - T_1|$. Aunque este dato puede

ser útil en el sentido que puede aportar información sobre cambios en el paisaje, puede subestimar el cambio verdadero producido en el sentido de que un cambio neto de cero no necesariamente indica una falta de cambio en el paisaje. Por ejemplo, en la Figura 3, la superficie en T_1 es igual que en T_2 , un análisis sólo de las superficies nos llevaría a concluir que esta categoría no ha sufrido cambios, no obstante, es posible que esa categoría haya experimentado cambios de tal manera que la superficie de pérdida en determinada zona sea la misma superficie de ganancia en otra distinta, por lo que en este caso ya no se puede hablar de cambio nulo del paisaje y la interpretación inicial no sería precisa.

Este cambio de forma o posición de las categorías es llamado “intercambio” e indica la cantidad de superficie que se ha intercambiado entre clases y se calcula como el doble del valor mínimo de las ganancias o de las pérdidas, es decir, que por cada

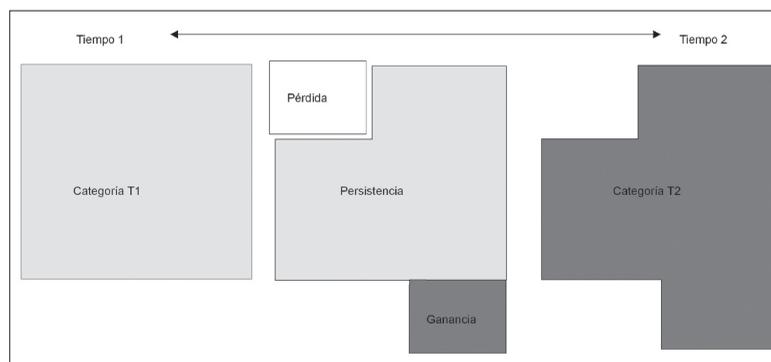


Figura 3. Cambios espaciales producto de ganancias y pérdidas.

Fuente: elaboración propia.

unidad de ganancia de una categoría hay la misma cantidad de pérdida para otra $S_j = 2 \times \text{MIN}(G_{ij}, L_{ij})$. Aunado a lo anterior, conocer la cantidad de superficie de las diferentes clases que se mantuvieron estables durante los diferentes tiempos estudiados es importante en el análisis de cambios de usos, en el sentido de que diversos estudios demuestran que lo estable es lo que predomina en la naturaleza, aun en zonas muy dinámicas como las ciudades (Yang, 2002). Este dato, denominado “persistencia”, se presenta en la diagonal principal de la matriz y además es importante para el cálculo de dos tipos de cambios: las ganancias y las pérdidas. Como se mencionó, estos datos sirven para el cálculo del intercambio, pero además para conocer el valor del “cambio total”, el cual es el resultado de la suma entre las ganancias y las pérdidas, es decir, $DT_j = G_{ij} + L_{ij}$. Estos datos permiten dimensionar el verdadero cambio sufrido por cada una de las categorías y saber si un paisaje es estable o está sufriendo cambios.

Adicionalmente, para reconocer si los cambios producidos entre las categorías corresponden a transiciones sistemáticas, es necesario determinar si estas ganancias y pérdidas son significativas. Para ello se construyen dos matrices denominadas de transición sistemática: una en función de las ganancias y otra en relación con las pérdidas, utilizando la fórmula siguiente y sustituyendo el valor de la pérdida o de ganancia según sea el caso.

$$T_{s_{ij}} = (P_{+n} - P_{jj}) \left(\frac{P_{n+}}{P - P_{n+}} \right).$$

Lo que se obtiene con estas matrices es la distribución de la ganancia o pérdida de cada categoría entre las demás de acuerdo con la proporción relativa que cada categoría debió presentar en el T_2 si el cambio fuera producto de un proceso aleatorio. Finalmente, para identificar si los valores de la matriz de transiciones sistemáticas son significativos, se considera la diferencia entre los valores observados (matriz de cambios) y los valores esperados (matriz de transiciones sistemáticas).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Crecimiento urbano

Producto de la metodología aplicada con imágenes de satélite y SIG, se obtuvieron dos mapas con las coberturas de suelo para 1990 y 2000, los cuales representarían la base para el análisis de cambios ocurridos por efecto del crecimiento urbano (Figura 4). De esta manera se pudo determinar que la ciudad en el año 2000 ocupaba una extensión de 1 466 km² de área construida, y que el crecimiento observado entre 1990 y 2000 está en alrededor del 16%. Con lo anterior, se observa que el proceso de metropolización mencionado en diversas publicaciones (Aguilar, 2002; Borsdorf, 2003), continúa incorporando progresivamente periferias rurales y áreas intersticiales para integrarlas al complejo urbano y crear vínculos funcionales con ellos (Figura 5).

La mancha urbana de la ZMCM se ha caracterizado por tener un acelerado ritmo de urbanización durante los 30 años posteriores a la década de los años cincuenta, impulsados por su patrón horizontal de ocupación y por la falta de cumplimiento de la regulación en materia urbana. Pese a haber aminorado su ritmo de crecimiento en la última década del siglo XX, sigue siendo una ciudad altamente concentradora del desarrollo económico y social del país, por lo que se ha ido expandiendo casi incontroladamente (Iracheta, 2002). En este sentido, es en el Estado de México donde se está produciendo el mayor dinamismo y las mayores transformaciones hacia suelo urbano. Para el 2000 este estado ya contaba con más del 50% del total del área urbana de la ciudad y dentro de sus límites se produjo el 88% del crecimiento de ésta (Tabla 5).

Tal comportamiento no sólo evidencia la expansión metropolitana, sino también los nuevos patrones migratorios que se escenifican. Estos desplazamientos explican en buena medida el intenso crecimiento que experimentaron los municipios conurbados, el menor dinamismo del Distrito Federal y los porcentajes nulos de las delegaciones centrales, siendo los municipios adyacentes al Distrito Federal los que continúan teniendo los porcentajes de cambio territorial más altos, tales

Tabla 5. Área de crecimiento de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

Estado	Área km ²		Área de crecimiento km ²
	1990	2000	
México	611	789	178
Distrito Federal	653	677	24
Total ciudad	1 264	1 466	202

Fuente: elaboración propia.

como Tultepec, Chalco, Chalco Solidaridad e Ixtapaluca; mientras que por superficie urbanizada, los municipios de Ecatepec, Valle de Chalco y Cuatitlán Izcalli ocuparon 25% del crecimiento total de la ciudad (Figura 6).

Detección de cambios

El objetivo principal de obtener el área urbana de la ZMCM era determinar en qué proporción este crecimiento afecta a las demás coberturas del suelo de la zona. Partiendo de los mapas obtenidos para 1990 y 2000 se obtuvo una matriz de tabulación cruzada la cual representa el procedimiento más

utilizado en estudios de detección de cambios (Yuan *et al.*, 2004; Pontius *et al.*, 2004; Tabla 6). A partir de esta matriz es posible observar la cantidad de superficie que ocupa cada una de las categorías en las dos fechas mencionadas, además de las persistencias, los intercambios entre clases y las ganancias y pérdidas totales para cada una de ellas.

Un primer análisis derivado de la matriz de tabulación que tome en cuenta el dato de la persistencia, podría llevar a conclusiones erróneas sobre la dinámica del territorio debido a que ésta es abrumadoramente superior a los cambios producidos, ya que en la zona la superficie que se mantuvo estable fue alrededor del 92% (Figura 7); no obstante, hay que tomar en cuenta que en la mayoría de los paisajes, la superficie de no cambio es lo que domina en el medio ambiente (Pontius *et al.*, 2004). En este sentido, lo interesante es analizar los datos fuera de la diagonal principal ya que permite identificar patrones dominantes y sistemáticos presentes en los análisis de cambios. Analizada la tabla de esta forma, se observa que en la zona ocurrieron 32 transiciones entre categorías (ganancias y pérdidas), y excepto lo urbano que

Tabla 6. Matriz de tabulación cruzada (datos en km²)

1990	2000								Total 1990	Pérdidas
	Agricultura de riego	Agricultura de temporal	Área urbana	Bosques	Cuerpo de agua	Sin vegetación	Vegetación arbustiva	Vegetación halófila		
Agricultura de riego	561.88	76.35	85.06	0	4.65	0.1	3.93	0.26	732.23	170.35
Agricultura de temporal	7.84	4558.91	67.66	83.04	0	0	79.36	1.3	4798.11	239.2
Área urbana	0	0	1264.96	0	0	0	0	0	1264.96	0
Bosques	0.02	41.77	3.94	1075.23	0	0	72.71	0	1193.67	118.44
Cuerpo de agua	0	0	0	0	12.55	0.01	0	0.01	12.57	0.02
Sin vegetación	0.05	0	0.31	0	1.22	69.38	0.01	0.18	71.15	1.77
Vegetación arbustiva	9.88	28.61	39.66	41.54	0	0.01	501.82	0	621.52	119.7
Vegetación halófila	6.25	0.29	4.73	0	3.03	4.34	0	122.66	141.3	141.3
Total 2000	585.92	4705.93	1 466.32	1199.81	21.45	73.84	657.83	124.41	8835.51	
Ganancias	24.04	147.02	201.36	124.58	8.9	4.46	156.01	1.75		

Fuente: cálculos propios.

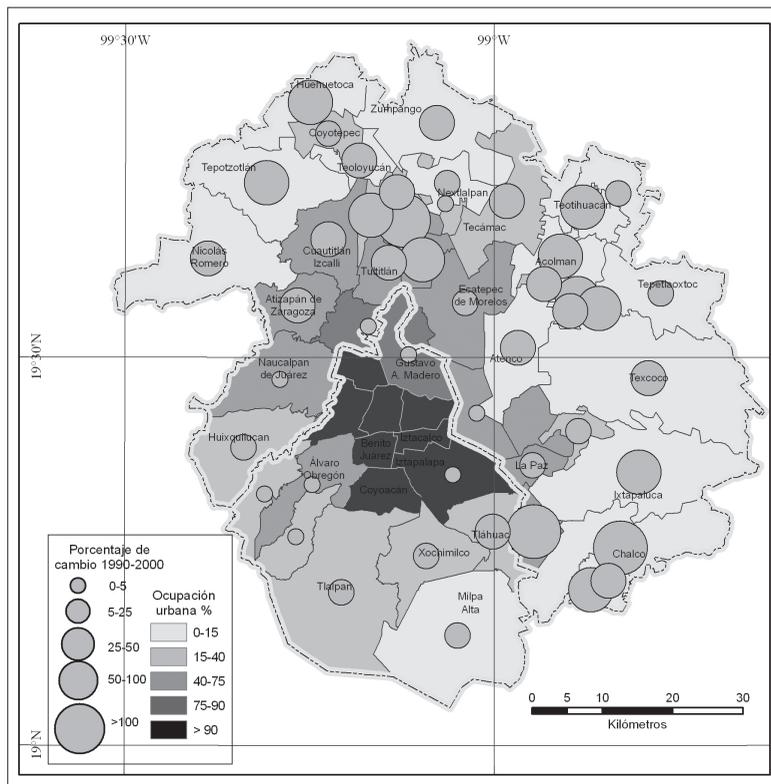


Figura 6. Ocupación y porcentaje de cambio del área urbana por municipio y delegación.

Fuente: elaboración propia.

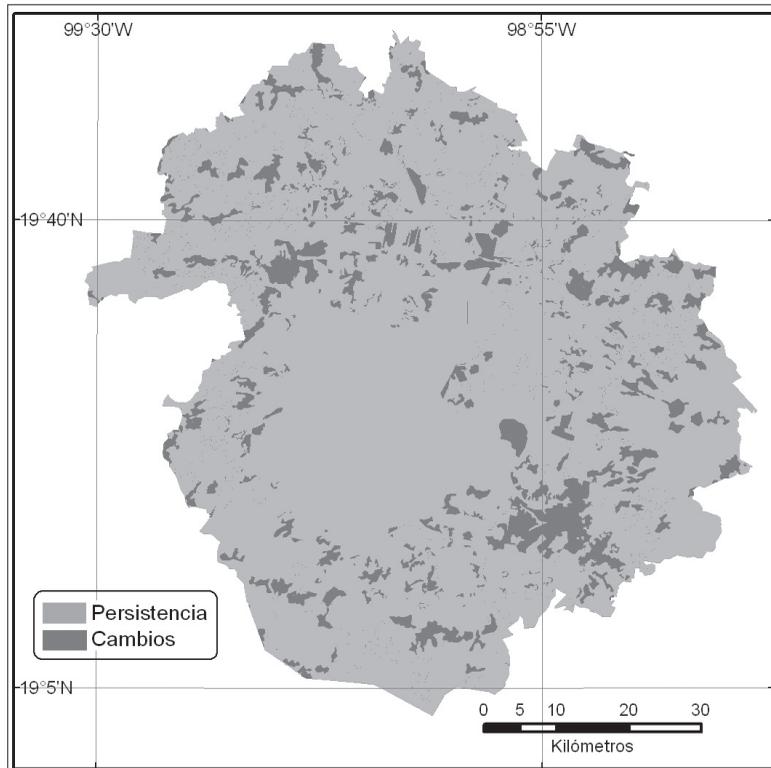


Figura 7. Persistencias y cambios entre categorías.

Fuente: elaboración propia.

presentó solamente ganancias, las otras categorías sufrieron intercambios, por lo que de esta manera se observa que en realidad el área en estudio presenta una dinámica de cambio muy considerable (Tabla 7).

El análisis del cambio neto, como punto de partida para identificar las señales de cambios, nos arroja que la mancha urbana incrementó un 16% su superficie respecto a la que tenía en 1990; las zonas agrícolas tuvieron una disminución en conjunto de más del 20% y las zonas forestales se mantuvieron prácticamente sin cambio con un 0.5% de ganancia, la vegetación halófila perdió 11% de su extensión, mientras que la vegetación arbustiva y los suelos sin vegetación aumentaron su área en 5 y 3%, respectivamente (Figura 8).

A pesar de que los valores obtenidos a partir del cambio neto dan una aproximación a la interpretación de los cambios producidos, éste no es suficiente para dar una visión clara sobre la dinámica territorial del paisaje en el sentido de que no se capturan las áreas de intercambio producidas entre coberturas, ni tampoco el cambio total que se produjo en el periodo de estudio; es decir, que se puede saber cuánta superficie cambió con respecto al año de origen y en qué sentido, pero no se puede saber si esa cobertura presentó modificaciones espaciales al interrelacionarse con otras, ni a cuánto ascendió

el valor total de ese cambio al final del periodo. Por esta razón, para realizar un análisis pormenorizado de la dinámica espacial, es necesario contar con el cálculo de la ganancia, la pérdida y el intercambio para cada categoría (Tabla 8).

Para ilustrar lo anterior, se puede tomar el ejemplo de las categorías de bosques y área urbana. En la primera se observa que el cambio total (real) es mayor al cambio neto, esto debido a que el cambio total es calculado como la suma de las ganancias y las pérdidas, mientras que con el cambio neto no es posible conocer las transiciones espaciales, ya que su cálculo proviene sólo de la diferencia de superficies entre 1990 y 2000. En esta categoría el cambio total resultó ser muy superior al cambio neto, es decir, que a pesar de que su superficie se mantuvo casi igual en ambas fechas (cambio neto), el intercambio de superficie con otras categorías, producto de las ganancias y las pérdidas, determinó su variación espacial, por lo que esta categoría resultó ser de las que más cambios tuvo en el territorio, detrás de la agricultura de temporal y la vegetación arbustiva. En lo que respecta a la categoría urbana, al presentar sólo ganancias, no tuvo intercambio de su superficie con ninguna otra categoría por lo que el cambio neto y total son iguales (Figura 9). Por último, si se realizará una estimación del cambio ocurrido en el periodo de estudio a partir del cambio neto,

Tabla 7. Transiciones entre categorías

1	Agricultura de riego a Agricultura de temporal	17	Cuerpo de agua a Vegetación halófila
2	Agricultura de riego a Área urbana	18	Sin Vegetación a Agricultura de riego
3	Agricultura de riego a Cuerpo de agua	19	Sin Vegetación a Área urbana
4	Agricultura de riego a Sin Vegetación	20	Sin Vegetación a Cuerpo de agua
5	Agricultura de riego a Vegetación arbustiva	21	Sin Vegetación a Vegetación arbustiva
6	Agricultura de riego a Vegetación halófila	22	Sin Vegetación a Vegetación halófila
7	Agricultura de temporal a Agricultura de riego	23	Vegetación arbustiva a Agricultura de riego
8	Agricultura de temporal a Área urbana	24	Vegetación arbustiva a Agricultura de temporal
9	Agricultura de temporal a Bosques	25	Vegetación arbustiva a Área urbana
10	Agricultura de temporal a Vegetación arbustiva	26	Vegetación arbustiva a Bosques
11	Agricultura de temporal a Vegetación halófila	27	Vegetación arbustiva a Sin Vegetación
12	Bosques a Agricultura de riego	28	Vegetación halófila a Agricultura de riego
13	Bosques a Agricultura de temporal	29	Vegetación halófila a Agricultura de temporal
14	Bosques a Área urbana	30	Vegetación halófila a Área urbana
15	Bosques a Vegetación arbustiva	31	Vegetación halófila a Cuerpo de agua
16	Cuerpo de agua a Sin Vegetación	32	Vegetación halófila a Sin Vegetación

Fuente: elaboración propia.

Tabla 8. Valores de transición entre categorías en kilómetros cuadrados

	Sup. 1990	Sup. 2000	Diferencia 1990 - 2000	Ganancias	Pérdidas	Intercambio	Cambio Neto	Cambio Total
Agricultura de riego	732	586	-146	24	170	48	146	194
Agricultura de temporal	4 798	4 706	-92	147	239	294	92	386
Área urbana	1 265	1 466	201	201	0	0	201	201
Bosques	1 194	1 200	6	125	118	237	6	243
Cuerpo de agua	13	21	8	9	0	0	9	9
Sin vegetación	71	74	3	4	2	4	3	6
Vegetación arbustiva	622	658	36	156	120	239	36	276
Vegetación halófila	141	124	-17	2	19	4	17	20

Fuente: elaboración propia.

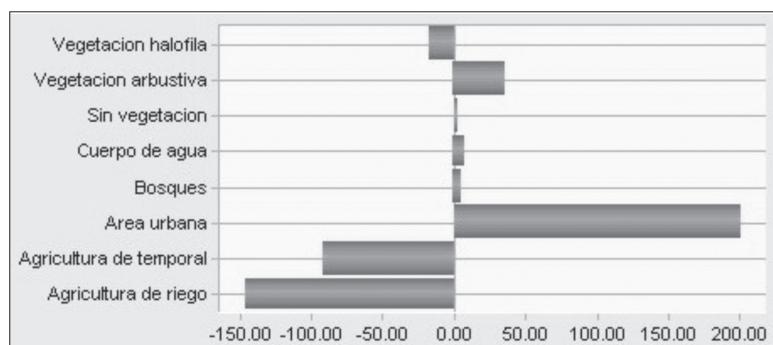


Figura 8. Cambio neto en kilómetros cuadrados.

Fuente: elaboración propia.

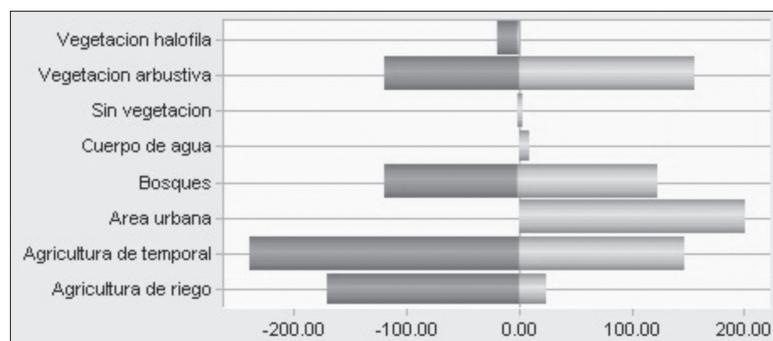


Figura 9. Ganancias y pérdidas por categoría en kilómetros cuadrados.

Fuente: elaboración propia.

se obtendría que la zona presentó modificaciones en su superficie de aproximadamente 510 km², lo cual está muy por debajo del cambio real ocurrido que es de alrededor de 1 335 km².

Presión urbana

En lo que respecta específicamente al comportamiento de la categoría urbana, como muestran los datos presentados en la matriz de tabulación, ésta ocupaba en el 2000 el 16% de la superficie total del área en estudio y fue la categoría que más suelo ganó durante la década de los noventa. Lo anterior representa el 15% del cambio total producido en la zona y las categorías sobre las que más se expandió fueron las áreas de cultivo (temporal y de riego) con 75% y la vegetación arbustiva con 20%, mientras que la vegetación halófila y los bosques aportaron en su conjunto el 4%. Este crecimiento trajo como consecuencia la pérdida de 85 km² de tierras de cultivo de regadío, 68 de temporal, 40 de vegetación arbustiva y cuatro de bosques (Figura 10).

Estos cambios se pueden explicar en parte por el patrón espacial de desarrollo que la metrópoli ha presentado, originado por las condiciones económicas y políticas que han impulsado las pautas para una urbanización desconcentrada o dispersa a través de la incorporación de las periferias rurales al entramado urbano. Los avances tecnológicos en telecomunicaciones, las mejoras en las vías de comunicación y las restricciones impuestas en la legislación respecto a la creación de nuevos asentamientos dentro del núcleo urbano central, han promovido desarrollos inmobiliarios en el Estado de México aprovechando las condiciones topográficas de la zona, pero también han fomentado

la ocupación ilegal de terrenos por el alto valor que el suelo ha llegado a representar, por lo que, a la vez que la ciudad se expandía, desplazaba usos donde antiguamente se desarrollaban actividades agropecuarias y aparecían asentamientos en zonas de protección ecológica (Schteingart y Salazar, 2005; Aguilar, 2003).

Aunque es importante considerar los valores de cambio totales por categoría, la ventaja de utilizar esta metodología, es que permite calcular los cambios sistemáticos significativos del territorio y no quedarse con los valores absolutos de cambio, por lo que se tiene una mejor percepción de la realidad al observar qué categoría es la que realmente está siendo más presionada en relación con su superficie. De esta manera, con los datos de la matriz de cambios sistemáticos (cambios esperados) y la matriz de cambios observados se puede ganar en entendimiento respecto a las categorías que están sufriendo mayor presión por parte del crecimiento urbano (Tabla 9).

Por ejemplo, si se toman solamente los datos de ganancias observadas en las categorías de agricultura de temporal y de vegetación arbustiva, el valor obtenido nos indica que la agricultura de temporal perdió más superficie que la vegetación arbustiva. Este resultado podría llevar a interpretaciones sesgadas respecto a los procesos de transición y a concluir que el área urbana está apuntando sistemáticamente más hacia la agricultura de temporal para reemplazarla. El hecho es que a pesar de que el valor es más alto, el análisis no considera que también esta categoría tiene una superficie total sensiblemente mayor que la vegetación arbustiva por lo que no es prueba suficiente para concluir

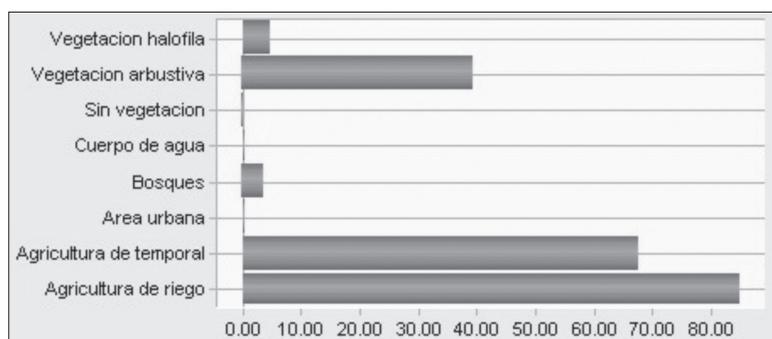


Figura 10. Contribución por categoría al crecimiento urbano en kilómetros cuadrados.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 9. Transiciones sistemáticas para el área urbana

Categoría	Ganancia observada	Ganancia esperada	Diferencia	Tasas
			$G_O - G_E$	$\left[\frac{G_O - G_E}{G_E} \right]$
1 Agricultura de riego	8 506	1 948	6 558	3.4
2 Agricultura de temporal	6 766	12 762	-5 996	-0.5
3 Bosques	394	3 175	-2 781	-0.9
4 Cuerpo de agua	0	33	-33	-1.0
5 Sin vegetación	31	189	-158	-0.8
6 Vegetación arbustiva	3 966	1 653	2 313	1.4
7 Vegetación halófila	473	376	97	0.3
Total	36.135	9.900	26.235	2.6

Fuente: elaboración propia.

que el área urbana está sistemáticamente ganando territorio a esta categoría. Por esta razón, para identificar las transiciones sistemáticas significativas es necesario considerar este cambio en relación con el tamaño de la categoría.

Un valor alto en la tasa indica que el cambio producido es importante para esa categoría, en tanto que los valores negativos significan que el área urbana no creció tanto como se esperaba dentro de esa categoría. La diferencia de tomar este dato es que permite observar cuáles categorías están apuntando sistemáticamente hacia lo urbano. Así, es posible determinar que la agricultura de riego es la categoría con el cambio más significativo, lo que quiere decir que el cambio de esta categoría hacia lo urbano es permanente y no parte de una asignación aleatoria, es decir, que esta categoría está sistemáticamente perdiendo superficie a favor de lo urbano y ese cambio además es significativo.

Contrario a lo que se observaba en los valores absolutos, la vegetación arbustiva presenta una tasa de 1.4, la cual es mayor que la presentada por la agricultura de temporal (-0.5), con este valor se puede observar que el cambio, aunque en términos absolutos sea menor, es más significativo que el producido para las zonas agrícolas de temporal. Por lo tanto, si las investigaciones se orientan a buscar transiciones entre coberturas, éstas no deben enfocarse sólo en las transiciones predominantes, ya que

son propensas a omitir los procesos de transición más sistemáticos.

CONCLUSIONES

El crecimiento urbano es uno de los fenómenos más extendidos en la actualidad y su repercusión en el medio ambiente requiere que nuevos análisis y metodologías se acerquen más a detalle a la realidad. El cambio ocurrido en el área en estudio, permitió determinar que la mancha urbana de la Ciudad de México sigue en constante crecimiento y fue responsable de más del 16% de los cambios sufridos en la zona durante la década de los noventa. Esta presión estuvo dirigida principalmente hacia las zonas de agricultura de riego y hacia la de temporal, donde se localizaron las mayores pérdidas por superficie, aunque los cambios más significativos se registraron en agricultura de riego y áreas con vegetación arbustivas.

En este sentido, la metodología empleada en este trabajo, a partir de la combinación de técnicas en Teledetección, SIG y análisis estadístico, ha demostrado su potencial para estudios en los que se involucren los cambios de usos de suelo, ya que no sólo permite obtener imágenes categorizadas de las coberturas, sino que permite cuantificar los cambios y observar su dinámica a diferentes niveles

de detalle, para con ello ganar en entendimiento sobre las diferentes coberturas que se están interrelacionando.

El trabajo trata de dar un acercamiento hacia un análisis que se mueva desde lo más general hasta los niveles más detallados de observación a partir del estudio de la persistencia y de dos pares de componentes: cambio neto e intercambio, así como de las ganancias y las pérdidas brutas. Con estos resultados se demuestra que no sólo es importante el análisis de las transiciones dinámicas predominantes, sino que la obtención de procesos de transición sistemáticos permite una interpretación más completa de los procesos que ocurren en el espacio.

Finalmente, para estudios futuros es necesario adentrarse en la búsqueda de factores explicativos del crecimiento urbano a través de metodologías de análisis estadístico simple y multinivel que permitan, por una parte, encontrar factores que influyan en el crecimiento urbano y, por otra, que haga posible que la información agregada a nivel administrativo, pueda ser utilizada de tal manera que se logre obtener ajustes adecuados en los modelos. Una vez logrado lo anterior, se estará en condiciones de realizar simulaciones de crecimiento urbano, a través de modelos normativos o predictivos con la utilización de las Tecnologías de la Información Geográfica que sean de utilidad para el planeamiento urbano.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la doctora Ana Córdoba y al geógrafo José Luis Pérez Damián de Instituto Nacional de Ecología por la cartografía proporcionada para la elaboración de este trabajo, referente al “uso de suelo y vegetación” para el área en estudio.

REFERENCIAS

- Aguilar, G. (2002), “Las mega-ciudades y las periferias expandidas. Ampliando el concepto en Ciudad de México”, *EURE*, núm. 28(85), pp. 121-149.
- Aguilar, G. (2003), “La megaurbanización de la Región Centro de México. Hacia un modelo de configuración territorial”, en Aguilar, G. (coord.), *Urbanización, cambio tecnológico y costo social. El caso de la región centro de México*, México, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Borsdorf, A. (2003), “Cómo modelar el desarrollo y la dinámica de la ciudad latinoamericana”, *EURE*, núm. 29(86), pp. 37-49 [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S025071612003008600002&lng=es&nrm=iso&tlng=es: 12 de mayo de 2007].
- Chuvieco, E. (2002), *Teledetección Espacial. La observación de la Tierra desde el espacio*, Ariel, Barcelona.
- Crist, E. and R. Kauth (1986), “The Tasseled Cap demystified transformations of MSS and TM data”, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, no. 52, pp. 81-86.
- Ezcurra, E., M. Mazari, I. Pisanty y A. Aguilar (2006), *La cuenca de México. Aspectos ambientales y de sustentabilidad*, Fondo de Cultura Económica, México.
- Guindon, B., Y. Zhang and C. Dillabaugh (2004), “Landsat urban mapping based on a combined spectral-spatial methodology”, *Remote Sensing of Environment*, no. 92(2), pp. 218-232.
- Huang, C., B. Wykie, L. Yang, C. Homer and G. Zylstra (2002), “Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance”, *International Journal of Remote Sensing*, no. 23(8), pp. 1741-1748.
- INEGI (2000), *SCINCE. Áreas conurbadas 2000*, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México.
- INEGI (2002), *Estadísticas del medio ambiente del Distrito Federal y Zona Metropolitana 2002*, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México.
- INE, IG UNAM (eds.; 2002), *Uso de Suelo y Vegetación 1993 y 2000 escala 1:250,000. Cobertura preparada para el análisis de cambio de uso del suelo*, Instituto Nacional de Ecología, México.
- Iracheta, A. (2002), *Desafíos en las áreas metropolitanas en el contexto de la globalización: gobernabilidad en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México*, Seminario Internacional: los desafíos de las áreas metropolitanas en un mundo globalizado, Barcelona.
- Kaya, S. and P. Curran (2006), “Monitoring urban growth on the European side of the Istanbul metropolitan area: a case study”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, no. 8(1), pp. 18-25.
- López, E., G. Bocco, M. Mendoza and E. Duhau (2001), “Predicting land-cover and land-use change in the urban fringe. A case in Morelia city, Mexico”, *Landscape and Urban Planning*, no. 55, pp. 271-285.

- Masser, I. (2001), "Managing our urban future: the role of remote sensing and geographic information systems", *Habitat International*, no. 25(4), pp. 503-512.
- Molina, M. (1998), *Análisis de calidad ambiental de vida para la Ciudad de Maracay, Venezuela usando la Teledetección y los SIG*, tesis doctoral, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Alcalá, España.
- ONU (2004), *Executive Summary. World Urbanization Prospects: The 2003 Revision*, Naciones Unidas, División de Población, Departamento de Asuntos Económicos y Sociales, Nueva York.
- Pontius, R. G. Jr., E. Shusas and M. McEachern (2004), "Detecting important categorical land changes while accounting for persistence", *Agriculture, Ecosystems and Environment*, no. 101, pp. 251-268.
- Seto, K., C. Woodcock, C. Song, X. Huang, J. Lus and R. Kaufmann (2002), "Monitoring land-use change in the Pearl River Delta using Landsat TM", *International Journal of Remote Sensing*, no. 23(10), pp. 1985-2004.
- Servidor de imágenes de satélite Global Land Cover [<http://glcf.umiacs.umd.edu/index.shtml>]: 14 de febrero de 2007].
- Schteingart, M., C. Salazar (2005), *Expansión urbana, sociedad y ambiente*, El Colegio de México, México.
- Sobрино, J. (2000), "Estructura física y etapas de metropolitanismo de la Ciudad de México", en Sánchez, A., *La Ciudad de México en el desarrollo económico nacional*, Instituto de Investigaciones Económicas, UNAM, México.
- Stefanov, W., M. Ramsey and P. Christiansen (2001), "Monitoring urban land cover change: an expert system approach to land cover classification of semiarid to arid urban centers", *Remote Sensing of Environment*, no. 77, pp. 173-185.
- Tan, M., X. Li, H. Xie and C. Lu (2005), "Urban land expansion and arable land loss in China a case study of Beijing-Tianjin-Hebei region", *Land Use Policy*, no. 22(3), pp. 187-196.
- Velázquez, A., J. Mas, G. Díaz, S. Mayorga, P. Alcántara, R. Castro, T. Fernández, G. Bocco, E. Ezcurra y J. Palacio (2002), "Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México", *Gaceta Ecológica*, núm. 62, pp. 21-37.
- Wu, C. (2004), "Normalized spectral mixture analysis for monitoring urban composition using ETM+ imagery", *Remote Sensing of Environment*, no. 93(4), pp. 480-492.
- Yang, X. and C. Lo (2002), "Using a time series of satellite imagery to detect land use and land cover changes in the Atlanta, Georgia metropolitan area", *International Journal of Remote Sensing*, no. 23(9), pp. 1775-1798.
- Yin, Z., D. Stewart, S. Bullart and J. MacLachland (2005), "Changes in urban built-up surface and population distribution patterns during 1986-1999: a case study of Cairo, Egypt", *Computers, Environment and Urban Systems*, no. 29(5), pp. 595-616.
- Yuan, F., K. Sawaya, B. Loeffelholz and M. Bauer (2005), "Land cover classification and change analysis of the Twin Cities (Minnesota) Metropolitan Area by multitemporal Landsat remote sensing", *Remote Sensing of Environment*, no. 98(23), pp. 317-328.